XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/110

Retroanálise Probabilística de um Talude da Formação Serra Geral Afetado por Chuvas Intensas

Murillo Vinícius Bednarczuk
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, murillobednarczuk@ufpr.br

Maria Eduarda Bus
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, bus.maria@ufpr.br

Tainá Silva Sá Britto
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, tainabritto@ufpr.br

Roberta Bomfim Boszczowski
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, roberta.bomfim@ufpr.br

Vítor Pereira Faro
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vpfaro@ufpr.br

RESUMO: Os eventos pluviométricos extremos que atingiram o Rio Grande do Sul em maio de 2024 desencadearam significativos processos de instabilidade geotécnica ao longo da BR-470/RS, expondo a necessidade de uma melhor compreensão dos mecanismos de ruptura em taludes. Este artigo apresenta uma retroanálise probabilística de um talude crítico que falhou durante esse evento. O objetivo central do estudo foi aplicar uma abordagem que incorporasse as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos, permitindo uma avaliação mais robusta do comportamento do maciço. A metodologia compreendeu a reconstrução do modelo geotécnico-conceitual e a realização de análises de estabilidade por equilíbrio limite, complementadas por simulações via método de Monte Carlo. Nesta abordagem, os parâmetros de resistência foram tratados como variáveis aleatórias, calibrados para representar as condições de ruptura observadas. Os resultados obtidos fornecem um referencial teórico-metodológico para a avaliação de risco, demonstrando que a abordagem probabilística constitui uma ferramenta eficaz para subsidiar futuros projetos de reconstrução e reforço, orientando intervenções mais resilientes a eventos climáticos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: Retroanálise Probabilística, Estabilidade de Taludes, Método de Monte Carlo.

ABSTRACT: The extreme rainfall events that hit Rio Grande do Sul in May 2024 triggered significant geotechnical instability processes along the BR-470/RS highway, exposing the need for a better understanding of slope failure mechanisms. This paper presents a probabilistic back-analysis of a critical slope that failed during this event. The central objective of the study was to apply an approach that incorporated the uncertainties inherent to geotechnical parameters, allowing for a more robust assessment of the soil mass behavior. The methodology comprised the reconstruction of the conceptual geotechnical model and the performance of stability analyses by limit equilibrium, complemented by simulations via the Monte Carlo method. In this approach, strength parameters were treated as random variables, calibrated to represent the observed failure conditions. The results obtained provide a theoretical-methodological reference for risk assessment, demonstrating that the probabilistic approach constitutes an effective tool to support future reconstruction and reinforcement projects, guiding interventions that are more resilient to extreme weather events.

KEYWORDS: Probabilistic Back-analysis, Slope Stability, Monte Carlo Method.

1 INTRODUÇÃO

Os eventos pluviométricos extremos registrados no Rio Grande do Sul em maio de 2024 provocaram um número expressivo de rupturas em taludes rodoviários, associadas principalmente à elevação do nível d'água e à consequente redução da resistência ao cisalhamento dos solos (Piza et al., 2025).

As análises determinísticas tradicionalmente empregadas na engenharia geotécnica baseiam-se em um conjunto único de parâmetros médios, o que pode não representar adequadamente a variabilidade natural dos materiais e as incertezas associadas às condições hidráulicas e mecânicas, especialmente em cenários de ruptura induzida por chuvas intensas.

Métodos probabilísticos são utilizados para incorporar explicitamente essas incertezas, permitindo uma interpretação mais realista do comportamento de taludes (Li & Lumb, 1987; Elkateb et al., 2002; Vanmarcke, 1977; Christian et al., 1994; Griffiths & Fenton, 2004).

A retroanálise probabilística, em particular, constitui uma ferramenta adequada para o estudo de taludes que já sofreram ruptura, pois permite calibrar os parâmetros resistentes de modo estatisticamente coerente com a condição observada em campo, em vez de buscar uma única combinação determinística ajustada, nessa abordagem, os parâmetros são tratados como variáveis aleatórias descritas por distribuições de probabilidade, possibilitando a identificação de múltiplas combinações compatíveis com o estado limite (Alonso, 1976; Baecher & Christian, 2003). O setor de segurança de barragens tem liderado a evolução desse tema ao utilizar métodos estatísticos para gerenciar riscos complexos e tratar a variabilidade dos materiais de maneira mais rigorosa, estudos contemporâneos de pesquisadores como Schwantz et al. (2025) e Lacerda et al. (2025) demonstram que a aplicação dessas técnicas em grandes estruturas de solo proporciona uma avaliação de confiabilidade e serve como um modelo importante para as análises probabilísticas.

Aplicações de métodos probabilísticos também têm sido desenvolvidas na análise de estabilidade de taludes. Nesse contexto, Riselo (2021) avaliou a estabilidade de um talude rodoviário por meio de abordagens determinísticas e probabilísticas, enquanto Katereniuk (2022) aplicou métodos probabilísticos à análise de taludes rochosos considerando a variabilidade da resistência ao cisalhamento.

Dessa forma, este trabalho apresenta uma retroanálise de um talude localizado na BR-470/RS que sofreu ruptura durante os eventos pluviométricos de maio de 2024, empregando uma abordagem probabilística como ferramenta de validação da solução determinística previamente obtida. O objetivo consiste em verificar se os parâmetros de resistência calibrados na etapa determinística são estatisticamente condizentes com a condição de ruptura identificada, por meio da propagação de suas incertezas através de simulações de Monte Carlo.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada baseia-se na aplicação de uma retroanálise probabilística da estabilidade de um talude rodoviário, combinando métodos de equilíbrio limite e simulações probabilísticas com o método de Monte Carlo, implementadas no software Slide2 (Rocscience). O procedimento compreende a definição do modelo geotécnico-conceitual, a calibração dos parâmetros iniciais na ruptura por meio de retroanálise determinística e a avaliação probabilística da estabilidade global do talude.

2.1 Caracterização do Talude

O talude analisado está localizado na rodovia federal BR-470/RS, no trecho de serra entre os municípios de Bento Gonçalves e Veranópolis, no estado do Rio Grande do Sul. A área insere-se no contexto geológico da Formação Serra Geral, caracterizada pela presença de solos coluvionares sobrejacentes a rocha basáltica alterada, conforme descrito por Perazzolo (2003) para taludes naturais da mesma unidade geológica. Esse colúvio constitui a parte mais suscetível à instabilidade, especialmente sob condições de saturação induzidas por eventos pluviométricos intensos, como o ocorrido em maio de 2024, que desencadeou a ruptura analisada neste estudo (CEMADEN, 2024). O modelo geotécnico foi definido a partir da topografia levantada em campo e registros fotográficos possibilitando a reconstrução da geometria do talude imediatamente anterior ao rompimento, a seção representativa adotada possui aproximadamente 40 m de altura e inclinação média da encosta da ordem de 35°. A condição hidráulica adotada na análise foi definida de forma hipotética, com

observação de campo, considerando o posicionamento do nível d'água na interface entre o solo e rocha, visto que não havia instrumentação ou monitoramento da encosta que permitisse a medição das poropressões in situ.

2.2 Retroanálise Determinística

A retroanálise determinística foi empregada para calibrar o modelo geotécnico até que a condição de ruptura observada em campo fosse reproduzida (FS=1). O modelo foi constituído por duas camadas: solo coluvionar, representado pelo critério de Mohr–Coulomb, e rocha basáltica alterada, representada pelo critério de Hoek–Brown Generalizado. A geometria do talude, a condição hidráulica associada ao evento pluviométrico extremo, o peso específico natural do solo e os parâmetros do maciço rochoso foram mantidos fixos ao longo de todo o processo de calibração, uma vez que representam características físicas do local e não variáveis de ajuste.

Para a rocha basáltica alterada da Formação Serra Geral foram adotados os seguintes parâmetros: UCS = 30 MPa, GSI = 40, mi = 15 e fator de distúrbio D = 1, conforme valores empregados por Pauli (2021) em taludes da mesma unidade geológica. Para o solo coluvionar, adotou-se peso específico natural $\gamma = 16$ kN/m³, aproximadamente conforme obtido por Perazzolo (2003). Os únicos parâmetros ajustados nesta etapa foram a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito efetivo (φ') do solo coluvionar, esses parâmetros foram progressivamente modificados por meio de análises de equilíbrio limite com o método de Morgenstern–Price e superfície de ruptura não circular, até que o fator de segurança global médio se aproximasse da condição de equilíbrio limite (FS ≈ 1) (Morgenstern & Price, 1965; Duncan, 1996). Ao final dessa etapa, obteve-se um conjunto determinístico de parâmetros capaz de reproduzir a ruptura observada em campo, o qual passou a representar o estado limite calibrado e a base de referência para a análise probabilística.

2.3 Procedimento de Análise de Estabilidade Probabilística

A partir da base determinística calibrada, apenas os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo coluvionar, c' e φ', foram considerados como variáveis aleatórias. A propagação dessa incerteza na estabilidade global do talude foi avaliada por meio de simulações de Monte Carlo, implementadas no software Slide2 (Rocscience). Em cada simulação, um par de valores aleatórios (c' e φ') é gerado a partir das distribuições de probabilidade adotadas, e o fator de segurança correspondente é calculado pelo método de equilíbrio limite (Baecher e Christian, 2003). A repetição desse processo ao longo de um grande número de iterações permite construir a distribuição probabilística do fator de segurança e estimar a probabilidade de falha como a fração de simulações em que FS < 1. Todos os demais parâmetros do modelo, incluindo a geometria, a condição hidráulica, o peso específico do solo e os parâmetros do maciço rochoso, permaneceram determinísticos e inalterados em relação à etapa de retroanálise determinística.

A variabilidade dos parâmetros de resistência tomou-se como limites físicos superiores e inferiores os valores de resistência de pico ($c' \approx 16$ kPa, $\varphi' \approx 31{,}7°$) e residual ($c' \approx 0$ kPa, $\varphi' \approx 9{,}7°$) obtidos por Perazzolo (2003) para solos coluvionares da Formação Serra Geral. Dentro desse intervalo, c' e φ' foram modelados por distribuições Normais truncadas, com intervalo de confiança de 95%, com coeficientes de variação da ordem de 33,5% para c' e 20,4% para φ', mantidos constantes ao longo das simulações. O número de simulações foi definido por:

$$N \geq \frac{z^2 P_f (1-P_f)}{\varepsilon^2} \qquad (1)$$

Adotando-se $P_f = 0{,}5$, $z = 1{,}96$ (intervalo de confiança de 95%) e erro absoluto admissível $\varepsilon = 0{,}05$, obtém-se $N \approx 400$, com o objetivo de reduzir o erro amostral e assegurar maior estabilidade estatística da estimativa, adotou-se $N = 1000$ simulações, em consonância com práticas usuais em análises de confiabilidade geotécnica discutidas por Fenton, Gordon A. e Griffiths, D. V. (2008). No contexto da retroanálise, a probabilidade de falha não é interpretada como medida de risco futuro, mas como indicador estatístico de coerência do estado limite calibrado, buscando-se uma distribuição de FS centrada em torno da unidade e uma P_f compatível com a ruptura observada (Baecher & Christian, 2003; Griffiths & Fenton, 2004).

As análises de estabilidade foram conduzidas por métodos de equilíbrio limite, adotando-se o método de Morgenstern–Price, por permitir o equilíbrio simultâneo de forças e momentos e admitir diferentes distribuições de esforços entre fatias (Morgenstern & Price, 1965; Duncan, 1996).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados das Análises Determinísticas

A retroanálise determinística conduziu à obtenção de um conjunto de parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo coluvionar capaz de reproduzir a condição de ruptura observada em campo, com fator de segurança global próximo da unidade. O par médio ajustado foi da ordem de $c' = 7$ kPa e $\varphi' = 25°$, resultando em FS ≈ 1,00 e em uma superfície crítica compatível, em geometria e profundidade, com o mecanismo de ruptura identificado no talude, conforme a Figura 1. Dessa forma, os parâmetros calibrados passaram a ser adotados como valores médios de referência para a etapa probabilística.

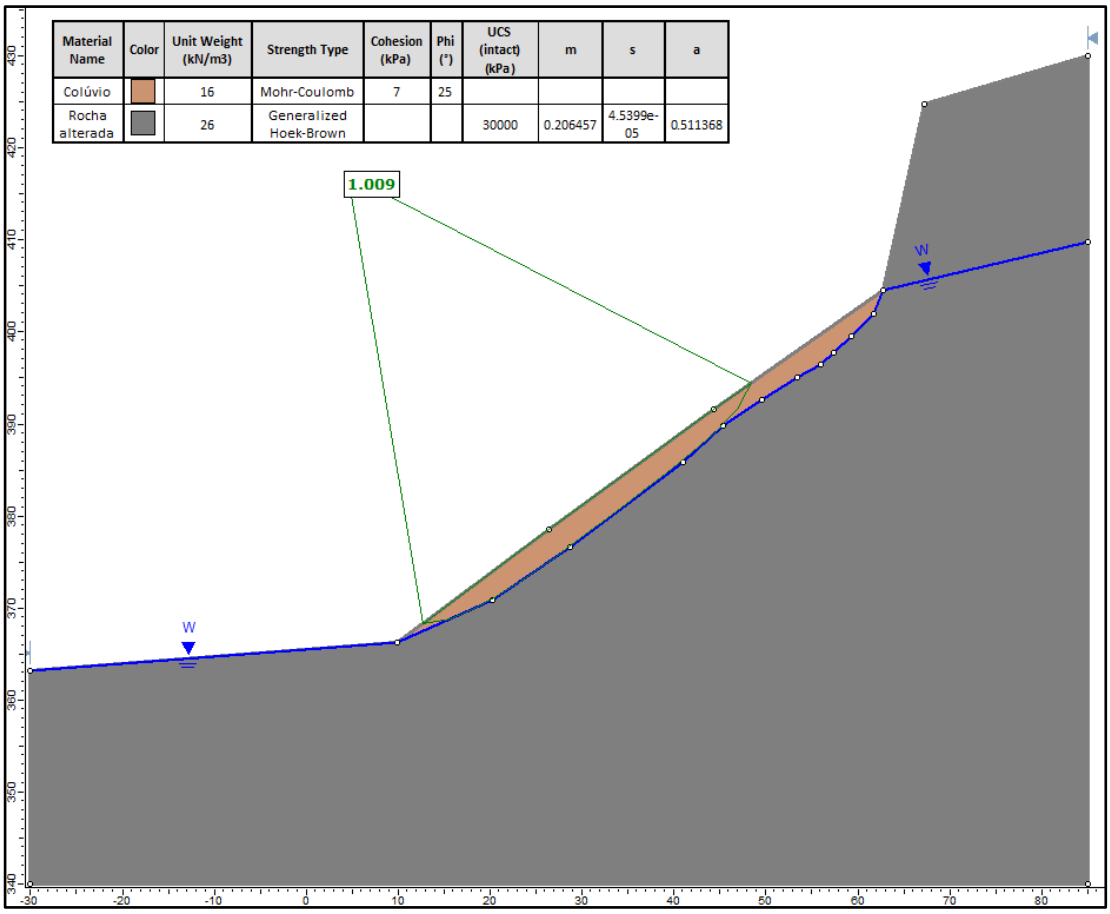


Figura 1. Seção geotécnica representativa do talude no Slide2 (Rocscience).

3.2 Resultados das Análises Probabilísticas

A partir dos parâmetros médios calibrados na etapa determinística, foram realizadas as simulações probabilísticas por meio do método de Monte Carlo, considerando a variabilidade estatística da coesão efetiva (c') e do ângulo de atrito efetivo (φ') da camada de solo coluvionar. A distribuição dos fatores de segurança obtidos é apresentada na Figura 2.

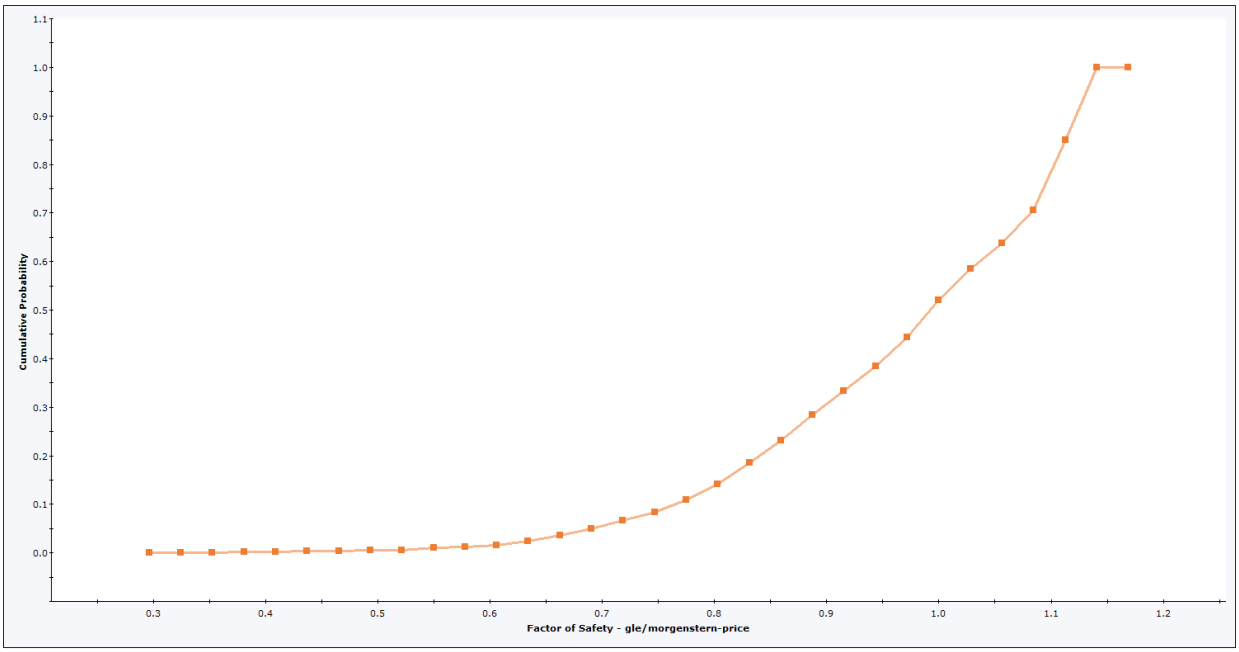


Figura 2. Distribuição dos fatores de segurança obtidos nas simulações de Monte Carlo.

O fator de segurança médio resultante foi de 0,965, com desvio padrão de 0,144. A probabilidade de falha, definida como a proporção de simulações com FS < 1, foi de 52%. Esse resultado é consistente com a natureza da retroanálise, na qual os parâmetros de resistência são calibrados para reproduzir uma condição de ruptura observada em campo. Como consequência, a distribuição dos fatores de segurança obtidos tende a se concentrar em torno do estado limite, de modo que parte das combinações de parâmetros resulte em FS inferior a 1. Assim, o valor obtido indica que o conjunto de parâmetros adotado é estatisticamente compatível com a condição de instabilidade analisada, em concordância com a interpretação probabilística proposta por Baecher e Christian (2003) e Griffiths e Fenton (2004).

3.3 Comparações e Discussões

Resultados probabilísticos de estabilidade de taludes mostram uma relação clara entre o fator de segurança médio e a probabilidade de ruptura. No estudo de Riselo (2021), fatores de segurança probabilísticos médios de 1,19 (2D) e 1,23 (3D) estiveram associados a probabilidades de ruptura relativamente baixas, de 1,24% e 0,64%, respectivamente, caracterizando uma condição globalmente estável do talude analisado. Por outro lado, Katereniuk (2022) obteve probabilidades de ruptura significativamente maiores em alguns cenários de instabilidade em taludes rochosos, com valores entre 62,4% e 84,1%, associados a fatores de segurança médios entre aproximadamente 1,08 e 1,50, dependendo da cunha e da envoltória de resistência considerada. Nesse contexto, o resultado obtido neste estudo, com FS médio de 0,965 e probabilidade de falha de 52%, posiciona-se entre os cenários observados por Riselo (2021) e Katereniuk (2022), sendo coerente com uma condição próxima ao estado limite de ruptura.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho aplicou uma retroanálise probabilística à ruptura de um talude da BR-470, desencadeada por chuvas extremas em maio de 2024, evidenciando como a elevação do nível d'água e a degradação da resistência do solo coluvionar podem ser representadas de forma mais realista quando os parâmetros são tratados como variáveis aleatórias. A calibração do modelo, conduzida até atingir fator de segurança médio próximo da unidade, resultou em probabilidade de falha da ordem de 52%, consistente com um estado de ruptura iminente e com a interpretação de que diferentes combinações de coesão e ângulo de atrito, dentro de um intervalo fisicamente admissível entre pico e residual, podem ter sido mobilizadas no instante do deslizamento. Em contraste com a prática corrente, fortemente apoiada em análises determinísticas baseadas

em um único par de parâmetros e um único valor de FS, os resultados mostram que a consideração explícita da variabilidade dos parâmetros resistentes modifica significativamente a leitura da segurança em taludes. Assim, a retroanálise probabilística se apresenta como uma ferramenta robusta para reinterpretar rupturas induzidas por eventos pluviométricos extremos, calibrar modelos geotécnicos e fornecer uma medida de confiabilidade que pode subsidiar os projetos de geotecnia.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à empresa Solution IPD pela disponibilização do acesso ao software *Slide2*, que viabilizou a realização das análises numéricas desenvolvidas neste estudo, bem como ao Departamento de Construção Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, E. E. (1976). *Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays*. Géotechnique, 26(3), 453–472.

Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons.

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (2024). Nota Técnica nº 412/2024: *Mapeamento dos movimentos de massa relacionados ao desastre de abril–maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul*. São José dos Campos. Disponível em: https://www.cemaden.gov.br/. Acesso em: 10 jul. 2025.

Christian, J. T., Ladd, C. C., & Baecher, G. B. (1994). *Reliability applied to slope stability analysis*. Journal of Geotechnical Engineering, 120(12), 2180–2207.

Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Elkateb, T., Chalaturnyk, R., & Robertson, P. K. (2002). *An overview of soil heterogeneity: Quantification and implications on geotechnical field problems*. Canadian Geotechnical Journal, 40(1), 1–15.

Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2004). *Probabilistic slope stability analysis by finite elements*. Journal of Geotechnical Engineering, 130(5), 507–518.

Katereniuk, S. B. (2022). *Avaliação da resistência ao cisalhamento de descontinuidades em metarenito,metasiltito e gnaisse e aplicação de método Probabilístico à estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Lacerda, C. F. B.; Pinto, G. H. da S.; Villar, L. F. de S. (2025). *Comparação dos Resultados de Diferentes Métodos de Análise Probabilística da Estabilidade de uma Barragem Hipotética de Rejeitos*. Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAE 2025. ABMS.

Li, K. S., & Lumb, P. (1987). Probabilistic design of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4), 520–535.

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1), 79–93.

Pauli, E. D. N. (2021). *Análise de Estabilidade de Talude Utilizando o Método de Scanline em uma Pedreira de Diabásio*. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 73 p.

Perazzolo, M. C. (2003). *Estudo da estabilidade de taludes naturais na Formação Serra Geral em Bento Gonçalves e Canela/RS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Piza, V. B. T.; Bednarczuk, M. V.; Schmidt, K. S.; Britto, T. S. S.; Faro, V. P. (2025). *Influência de eventos pluviométricos na estabilidade de taludes: revisão de literatura*. Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAE 2025. ABMS.

Riselo, B. C. de T. (2021). *Análise de estabilidade de um talude rodoviário por meio de Modelo determinístico e probabilístico e previsão do volume de Massa mobilizada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Schmidt, K. S.; Bednarczuk, M. V.; Piza, V. B. T.; Britto, T. S. S.; Faro, V. P. (2025). *Influência da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento na estabilidade de talude da Formação Serra Geral.* Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAE 2025. ABMS.

Schwantz, M. da C.; Vieira, L. V.; Belchior, I. M. R. M.; Alves, A. M. de L. *Análise Geotécnica Probabilística da Estabilidade dos Taludes da Barragem Santa Bárbara – Pelotas/RS*. Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAE 2025. ABMS.

Vanmarcke, E. H. (1977). *Reliability of earth slopes*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, *ASCE*, 103(GT11), 1247–1265.